



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO**  
**INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING

## **STUDIE PROVOZU PLYNOVÉ MIKROTURBÍNY**

STUDIES ON GAS MICROTURBINE OPERATION

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

*BACHELOR'S THESIS*

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**JAN HORNÍK**

**VEDOUcí PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Mgr. MAREK VONDRA**

BRNO 2014



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2013/14

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jan Horník

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Studie provozu plynové mikroturbíny**

v anglickém jazyce:

### **Studies on gas microturbine operation**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Součástí výzkumu v Laboratoři energeticky náročných procesů NETME Centre je testování plynové mikroturbíny (používané i v automobilní technice). Mikroturbína pracuje v kogeneračním provozu, do procesu dodává elektrickou energii a teplo. Náplní práce bude měření, zpracování a vyhodnocení vstupních a výstupních provozních veličin, jichž bude dále využito při optimalizaci celého procesu.

Téma je možné v budoucnu rozšířit do podoby diplomové práce řešené v rámci navazujícího magisterského studia oboru Procesní inženýrství.

Cíle bakalářské práce:

Teoretické uvedení do problematiky plynových mikroturbin a kogenerace. Představení zkoumaného energeticky náročného procesu.

Naplánování a provedení měření provozních veličin.

Zpracování naměřených dat pomocí vhodného počítačového programu.

Výpočet a zhodnocení celkové účinnosti mikroturbíny.

Seznam odborné literatury:

GIAMPAOLO, T. Gas turbine handbook: principles and practice. 4th ed. Lilburn :: Fairmont Press, c2009, xiii, 447 s. ISBN 978-1-4398-0191-8.

DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 281 s. ISBN 80-7300-118-7.


TOFEL, J. Integrace plynové mikroturbíny do energetického systému prádelny. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 49 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Bobák.


Vedoucí bakalářské práce: Ing. Mgr. Marek Vondra

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 12.11.2013



  
prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
Ředitel ústavu

U2   
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan

## **Abstrakt**

Bakalářská práce je zaměřena na studii provozu plynové mikroturbíny. Její teoretická část seznamuje čtenáře s plynovou mikroturbínou. Praktická část se zaměřuje na její využití v provozu průmyslového praní prádla.

Analytická část obsahuje návrh a realizaci měření, na která navazují potřebné výpočty. Na jejich základě je navrženo využití spalín z mikroturbíny ve zmíněném provozu. Finálním výstupem práce je pak finanční bilance pro jednotlivá řešení, která shrnují ekonomickou návratnost nákupu mikroturbíny.

## **Abstract**

The bachelor thesis is focused on the study of the gas microturbine. Theoretical part makes the reader familiar with gas microturbine. Practical part is focused on its use in the field of industrial laundry.

Analytical part includes the design and execution of measurement, which is followed by necessary calculations. On the basis of it is proposed several uses of combustion from microturbine. The final output of this work is financial balance for each of those uses, where can be seen return of the investment.

## **Klíčová slova:**

Plynová mikroturbína, účinnost, spaliny, průmyslová údržba prádla, ekonomická návratnost

## **Keywords:**

Gas microturbine, efficiency, combustions, industrial laundry care, economic return

#### **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HORNÍK, Jan. *Studie provozu plynové mikroturbíny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Mgr. Marek Vondra.

**Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: „Studie provozu plynové mikroturbíny“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne

Podpis autora

**Poděkování:**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Mgr. Marku Vondrovi za jeho užitečnou pomoc, cenné rady a komunikaci při řešení mé bakalářské práce.

Zároveň bych rád poděkoval rodině za vydatnou podporu a důvěru při mém studiu.



## Obsah

1 ÚVOD .....	12
2 PLYNOVÁ MIKROTURBÍNA.....	13
2.1 Vznik a vývoj.....	13
2.1.1 MT v ČR.....	14
2.1.2 MT ve světě.....	15
2.2 Popis a fungování MT, její části .....	15
2.2.1 Odvod energie do sítě .....	17
2.2.2 Výhody MT oproti spalovacím motorům .....	17
2.2.3 Palivo .....	18
2.3 Kogenerace .....	18
2.4 Zkoumaný energeticky náročný proces .....	18
2.4.1 Praní .....	18
2.4.2 Sušení.....	18
3 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ .....	20
3.1 Realizace měření a naměřené hodnoty .....	20
3.1.1 Měřicí technika .....	20
3.1.2 Naměřené hodnoty .....	21
3.2 Určení elektrické, tepelné a celkové účinnosti pro výkon 5 kW .....	24
3.3 Účinnosti pro další měřené výkony .....	25
3.4 Chyba měření.....	26
3.5 Nalezení chyby a její řešení.....	27
3.5.1 Chyba v měření tlaku .....	27
3.5.2 Chyba v měření teploty .....	28
3.5.3 Chyba v měření tlaku v Prandtlově trubici .....	28
3.5.4 Chyba v určení molární hmotnosti.....	28
3.5.5 Chyba v určení měrné tepelné kapacity .....	29
3.5.6 Chyba v měření průtoku zemního plynu.....	29
4 NÁVRHY VYUŽITÍ MT.....	30
4.1 Využití spalin při výkonu 5 kW na sušení prádla.....	30
4.2 Využití spalin při výkonu 25 kW .....	32
5 ZÁVĚR.....	36
6 POUŽITÁ LITERATURA.....	37

## Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
$c_s$	[J/kg °C]	Měrná tepelná kapacita spalin zemního plynu
$D$	[m]	Průměr potrubí pro odvod spalin
$LHV$	[kJ/m <sup>3</sup> ]	Výhřevnost zemního plynu při normálních fyzikálních podmínkách
$M$	[g/mol]	Molární hmotnost spalin
$m_i$	[kg/s]	Hmotnostní tok spalin dle výrobce
$m_M$	[kg/s]	Hmotnostní tok směsi spalin a vzduchu
$m_s$	[kg/s]	Hmotnostní tok spalin
$m_v$	[kg/s]	Hmotnostní tok vzduchu
$P_i$	[kW]	Elektrický výkon
$p_i$	[kPa]	Atmosférický tlak
$p_{PRETLAK\_i}$	[Pa]	Přetlak v potrubí zemního plynu
$p_s$	[Pa]	Atmosférický tlak při normálních fyzikálních podmínkách
$P_{SUSIC}$	[kW]	Výkon sušiče
$Q_M$	[J]	Energie směsi spalin a vzduchu
$Q_o$	[J]	Energie odvedená
$Q_p$	[J]	Energie přivedená
$Q_{PRACKA}$	[MJ/8 hod]	Spotřebovaná tepelná energie pro ohřev vody v pračce
$Q_{PRACKA2}$	[W]	Spotřebovaná tepelná energie pro ohřev vody v pračce
$Q_{PREBYTEK}$	[W]	Přebytečná energie
$Q_s$	[J]	Energie ve spalinách
$Q_v$	[J]	Energie v nasávaném vzduchu
$Q_{VYROBCE\_i}$	[J/s]	Energie ve spalinách dle výrobce
$Q_{ZEMNI\_PLYN\_i}$	[W]	Energie ve spalinách spočítaná
$R$	[J/mol K]	Molární hmotnost spalin
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha průřezu potrubí pro odvod spalin
$t_i$	[°C]	Teplota spalin v potrubí
$t_{iL}$	[°C]	Teplota v laboratoři
$T_s$	[K]	Teplota vzduchu při normálních fyzikálních podmínkách
$t_{sp}$	[°C]	Teoretická teplota spalin
$t_{SUSIC}$	[°C]	Teplota směsi pro sušič
$T_{ZEMNI\_PLYN}$	[K]	Teplota odebíraného zemního plynu

<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Význam</b>
$V_{SS}$	[m <sup>3</sup> /hod]	Spotřeba zemního plynu při normálních fyzikálních podmínkách
$V_i$	[m <sup>3</sup> /hod]	Spotřeba zemního plynu
$v_i$	[m/s]	Rychlost proudění spalín v potrubí
$V_{iN}$	[m <sup>3</sup> /hod]	Objemový tok spalín v potrubí
$V_S$	[m <sup>3</sup> /hod]	Objem směsi spalín a vzduchu ve směšovači za normálních fyzikálních podmínek
$V_{SP}$	[m <sup>3</sup> /hod]	Objem spalín v potrubí za normálních fyzikálních podmínek
$V_{SPALINY-SUSIC}$	[m <sup>3</sup> /hod]	Spaliny potřebné k namíchání směsi
$V_{SUSIC}$	[m <sup>3</sup> /hod]	Potřebný objemový tok spalín pro sušič
$V_V$	[m <sup>3</sup> /hod]	Objem nasátého vzduchu za normálních fyzikálních podmínek
$V_{ZEMNI\_PLYN}$	[m <sup>3</sup> ]	Objem zemního plynu potřebného pro ohřev v kotli
$\rho_i$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota spalín
$\Delta p_i$	[Pa]	Rozdíl tlaků v Prandtlově trubici
$\Delta t_i$	[°C]	Rozdíl teploty spalín a teploty v laboratoři
$\Delta t_{SUSIC}$	[°C]	Rozdíl teplot
$\eta_{EL\_i}$	[%]	Elektrická účinnost mikroturbíny
$\eta_i$	[%]	Celková účinnost mikroturbíny
$\eta_{iT}$	[%]	Tepelná účinnost mikroturbíny
$\eta_{KOTEL}$	[%]	Tepelná účinnost kotle

Index **i** u všech výše uvedených symbolů je indexem výkonu, který tuto hodnotu přiřazuje danému měřenému výkonu.

## Seznam obrázků

Obr. 1: Základní řez MT [3] .....	13
Obr. 2: MT Capstone C30 na VUT BRNO .....	14
Obr. 3: MT vyvíjená firmou IHI Corporation [9] .....	15
Obr. 4: p-V diagram Braytonova cyklu [10] .....	16
Obr. 5: Řez plynovou MT [3] .....	16
Obr. 6: Schéma obvodu rekuperátoru [3] .....	17
Obr. 7: Vsádkové pračky v LENP .....	19
Obr. 8: Sušič Primus T24G .....	19
Obr. 9: Odporový snímač teploty SENSIT PTS 65 .....	20
Obr. 10: Převodníky diferenciálního tlaku Prandtlovy trubice .....	21
Obr. 11: Manometry pro měření přetlaku v plynovém potrubí .....	21
Obr. 12: Graf závislosti spotřeby zemního plynu na výkonu .....	23
Obr. 13: Závislost elektrické účinnosti na elektrickém výkonu .....	26
Obr. 14: Schéma zapojení pro kapitolu 4.1 .....	30
Obr. 15 Uzel pro hmotnostní a energetickou bilanci pro kapitolu 4.1 .....	31
Obr. 16 Schéma zapojení pro výkon 25 kW .....	33
Obr. 17 Uzel pro hmotnostní a energetickou bilanci pro kapitolu 4.2 .....	34

## 1 ÚVOD

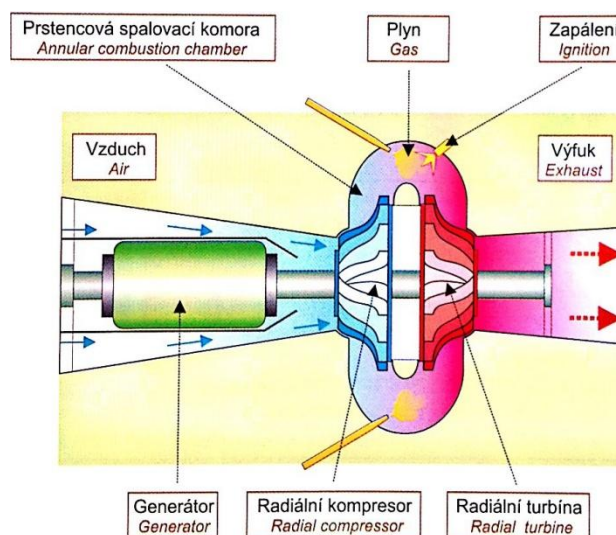
S neustálým a čím dál tím rychlejším lidským vývojem jde ruku v ruce vzrůstající spotřeba elektrické energie. Česká republika v tomto ohledu není výjimkou. Dá se tedy říci, že pro trvale udržitelný rozvoj, jenž je balancí mezi rostoucí úrovní lidského života a životním prostředím, je potřeba udržovat a zefektivňovat produkci energií, jejich distribuci i samotné využití. Je však zároveň důležité nebrat v potaz pouze problém toho, jak co nejlevněji a nejefektivněji vyrobit energii, ale dělat to s ohledem na životní prostředí. Také díky důrazu na životní prostředí se objevují nové technologie, které jsou podobně efektivní a zároveň jsou schopny být šetrnější k přírodě, než ty stávající. A protože legislativa Evropské unie, do které patří i Česká republika, neustále zpřísňuje limity na tvorbu zplodin u spalovacích zařízení, je potřeba podporovat výzkum takovýchto zařízení a jejich technologií. K tomuto cíli by měly směřovat všechny technicky vyspělé státy. Jedním z příkladů takovéto „čisté“ technologie je i plynová mikroturbína, která dokáže při velmi nízkých emisních limitech produkovat teplo i elektrickou energii.

Využitím jedné takové mikroturbíny se zabývá Laboratoř energeticky náročných procesů (dále jen „LENP“). Ta se zaměřuje na základní i aplikovaný výzkum, který je rozvíjen okolo unikátního pracoviště nazvaného Model energeticky náročného spotřebitele [1]. Jedním z problémů, kterým se v současné době laboratoř věnuje, je analýza integrace plynové mikroturbíny do průmyslového provozu. Tímto provozem je průmyslové praní prádla, které je v rámci LENP energeticky náročný proces. Zde má mikroturbína Capstone C30 sloužit jako generátor elektrické energie. Aby bylo dosaženo vyšší účinnosti mikroturbíny, je zamýšleno využít spaliny z mikroturbíny k sušení prádla v bubnovém sušiči a případnému ohřevu vody. Systém tak slouží ke kombinované produkci tepelné a elektrické energie.

V úvodu této práce je čtenář seznámen s plynovou mikroturbínou. Nákup takového zařízení vyžaduje vysokou počáteční investici, a tak je potřeba na základě konkrétní situace zvážit, zda je dané využití ekonomicky rozumné. Z tohoto důvodu se práce zabývá návrhem a realizací měření, na jejichž základech bude stanovena návratnost investice. Tato měření byla provedena v LENP, která spadá do divize energetiky, procesů a ekologie. Tato divize je součástí NETME Centre, jež je koncipováno jako regionální výzkumné a vývojové centrum FSI VUT v Brně.

## 2 PLYNOVÁ MIKROTURBÍNA

Mikroturbína (dále jen „MT“) je rotační lopatkový stroj (obr. 1), jehož pracovní látkou je plyn. Ten vzniká spálením směsi ve spalovací komoře, která předává část svojí energie přes turbínu hřídeli. MT se od turbíny liší především rozměry a dodávaným výkonem. Dodávaný jmenovitý elektrický výkon je do 500 kW. Kromě elektrického výkonu může dodávat i tepelný výkon, čímž roste její celková účinnost [2].



Obr. 1: Základní řez MT [3]

### 2.1 Vznik a vývoj

Vývoj MT vychází ze zkušeností s turbodmychadly v automobilovém průmyslu, proudovými motory v leteckém průmyslu a takzvanými APU jednotkami (Auxiliary Power Unit). Jedná se o pomocné energetické jednotky, které slouží například pro rozběh leteckých motorů. U letadel nastal boom využívání kompresorů během druhé světové války, kdy se začaly objevovat první proudová letadla [2].

Vývoj mikroturbín pro všestranné využití by se dal ovšem datovat až rokem 1988, kdy byla v Americe zaregistrována firma Capstone Turbine Corporation, která se v současné době specializuje na výrobu mikroturbín a je jejich největším producentem. Ve světě existují i další producenti, kteří vyrábějí tato zařízení. Například firmy Turbec Spa (Itálie) či General Electric (USA). Řada firem však trh s MT již opustila [3].

V této kapitole se nabízí otázka, jak je možné, že se MT začaly vyvíjet až v 80tých letech. Zejména s přihlédnutím k faktu, že první provozuschopná plynová turbína byla vyrobena začátkem 20. století (Holzwartova turbína) [4]. V porovnání s klasickými turbínami jsou u MT problémy vyplývající z provozních otáček. Turbína v teplárně se otáčí rychlostí 15000 až 20000 otáček/minutu, zatímco hřídel MT Capstone C30 může mít až 96000 otáček/minutu [5]. Turbíny totiž obecně dosahují vyšší elektrické účinnosti až v momentě, kdy se rychlost konců lopatek u turbíny začne blížit rychlosti zvuku. Z tohoto důvodu se se zmenčujícími rozměry zvětšují otáčky těchto zařízení. Jsou zde tedy kladeny extrémní nároky na generátor a zejména na ložiska, která jsou kritickým prvkem u MT. Některé firmy ještě využívají olejová ložiska. Většina MT je však již dnes vybavena ložisky mazanými vzduchovou vrstvou, která je pod tlakem hnána mezi rotující hřídel a statickou část ložiska. Vzduchová vrstva pak při zatížení přenáší síly působící mezi hřídelí a ložiskem. To má za následek to, že zde prakticky nejsou styčné plochy a nedochází tak k jejich opotřebení. Životnost takovýchto ložisek u MT

Capstone C60 je tak udávaná na 14000 startů. Lze tedy říci, že hlavním omezením ve vývoji MT jsou vlastnosti použitých materiálů. [6].

### **2.1.1 MT v ČR**

MT zatím konkurují plynové motory. A to především vstupními investicemi. Proto není rozšíření plynových MT tak zásadní. Přesto se v České republice průběžně objevují nové instalace. Zde je několik příkladů:

#### **Sídliště v Českém Brodě**

MT Capstone C30 v Českém Brodě byla v roce 2001 historicky první, která byla nainstalována na území České republiky. Pod označením C30 v názvu se skrývá údaj o maximálním elektrickém výkonu, který činí 30 kW. Bezobslužná turbína je řízena dálkově z centrály v Kolíně. MT se nyní využívá pouze v době vysokého tarifu výkupu cen energií, tj. 8 hodin denně. I přesto byla jednotka celkově v provozu 34000 hodin. Během této doby nastal problém pouze s kompresorem plynu, který se opakoval. Jinak jednotka běží bez problému. Jedinou servisní péčí je 2x do roka čištění plynového filtru a jeho občasná výměna [3].

#### **Capstone C65**

První MT o elektrickém výkonu 65 kW byly instalovány v ČR v roce 2008. Tato sestava je schopna startovat ze tmy. Což znamená, že je, díky baterii, schopna sama sebe nastartovat, bez potřeby rozvodné sítě [3].

Ty samé modely jsou instalované i v Havířově a Českém Těšíně. V Havířově byla instalace provedena do kotelny firmy Gascontrol s.r.o. (producent plastových rour), kde slouží zejména k ohřevu teplé vody, která se ukládá do zásobníku. V Českém Těšíně se provedla instalace ve firmě Kovona. Zde se teplo využívá v sušící peci. Ze sušičky je část tepla ještě využita pro ohřev vody [3].

#### **Capstone C800**

Zatím se jedná o nejvýkonnější MT, která byla v ČR instalována. Elektrický výkon činí 800 kW. Odběratelem byla zemědělská biostanice u Slaného [3].

#### **Instalace na vysokých školách**

VUT BRNO využívá model Capstone C30 (obr. 2) ke zkoumání energeticky náročných procesů [3].



Obr. 2: MT Capstone C30 na VUT BRNO

Vysoká škola báňská využívá od roku 2007 typ Capstone C30. Univerzita zkoumá pohon zařízení odpadním teplem [3].

### Ústřední čistírna odpadních vod v Praze

Zde byla na několik týdnů zapůjčena MT Capstone C30 na produkci elektřiny. K pohonu sloužil bioplyn, pro jehož produkci byl využit kal odstraněný z čištěné vody. MT zde již sice není, ale jedná se o pěknou ukázkou toho, kde je možné toto zařízení aplikovat [3],[7].

### První brněnská strojírna Velká Bíteš

Divize letecké techniky vyrábí pomocné energetické jednotky s výkonem do 100 kW, které slouží k napájení elektrické sítě letadla/vrtulníku předtím, než jsou nastartovány hlavní pohonné jednotky [8].

#### 2.1.2 MT ve světě

Velice zajímavý model, co do velikosti, vyvíjí Japonská firma IHI Corporation. Tato plně funkční, přenosná mikroturbína (obráz. 3) se vejde celá, včetně plynové kartuše, do obalu, který má zhruba velikost cestovního kufru. Tudiž ji bez problému přeneseme jeden člověk. Její elektrický výkon činí 400 W. A maximální otáčky dosahují více jak 400 000 otáček/minutu. I když se zatím jedná jen o prototyp, jedná se o názornou ilustraci dnešních možností. Firma vidí v budoucnu její využití například k pohonu robotů [9].



Obr. 3: MT vyvíjená firmou IHI Corporation [9]

V ruském Soči byly do nákupního centra dodány 4 kontejnery Capstone 1000 (1 kontejner=5 MT Capstone C200). Tuto zakázku získala brněnská firma Enkom, a.s [3].

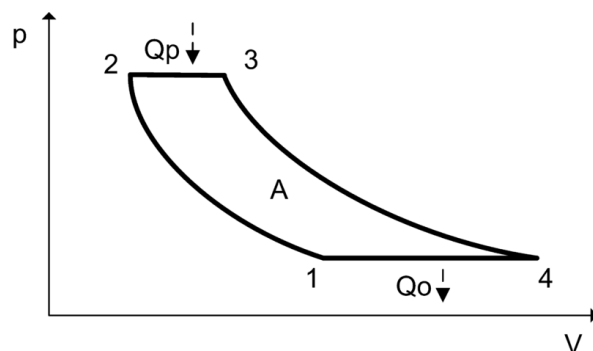
Aplikace MT je opravdu širokosáhlá. Mimo jiné najdeme MT u automobilů, autobusů, lodí, důlních lokomotiv, čistících stanic odpadních vod, dálkově řízených modelů letadel nebo datových komunikačních center [3].

#### 2.2 Popis a fungování MT, její části

Hřídel MT je nejprve roztočena startérem, což je stator, do kterého je přiveden střídavý elektrický proud. Rotor, který leží v elektromagnetickém poli statoru, je tak postupně roztáčen. Vzduchový kompresor na hřídeli začne stlačovat vzduch do spalovací komory, kam se kromě vzduchu vhání pod tlakem pomocí kompresoru i plyn, který se smíchá se vzduchem. Tato směs je pak jednorázově elektricky zapálena a dochází k její expanzi. Část energie  $Q_p$  je využita pro roztočení hřídele MT. Zbytek energie  $Q_o$  odchází ve spalínách. Do spalovací

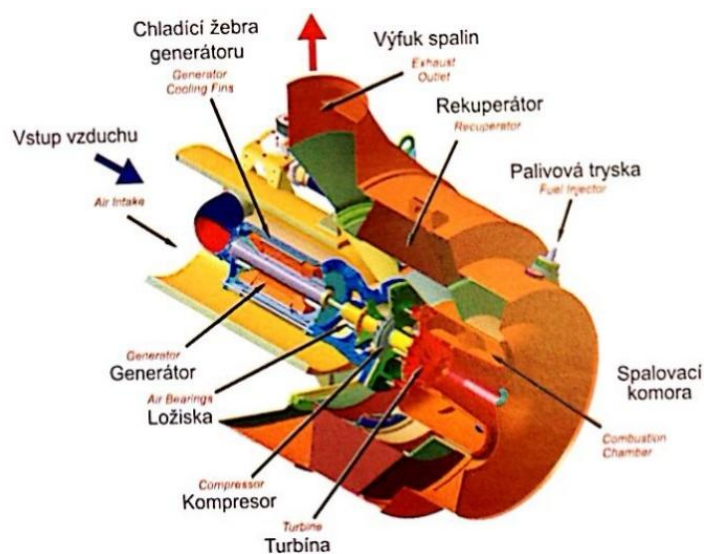


komory je průběžně dodávána směs, a tak vzniká cyklus. Tento cyklus se nazývá Braytonův (obr 4). Opakováním tohoto cyklu dochází k pohonu spalovací turbíny. Poté již může asynchronní generátor vyrábět elektřinu. Přifázováním generátoru k síti pomocí elektrického systému je zajištěna dodávka elektrické energie do sítě.



Obr. 4: p-V diagram Braytonova cyklu [10]

Základními částmi MT (obr. 5) jsou spalovací komora, tryska, spalovací turbína, ložiska, generátor, kompresor vzduchu a sací trakt a filtr vstupního vzduchu.



Obr. 5: Řez plynovou MT [3]

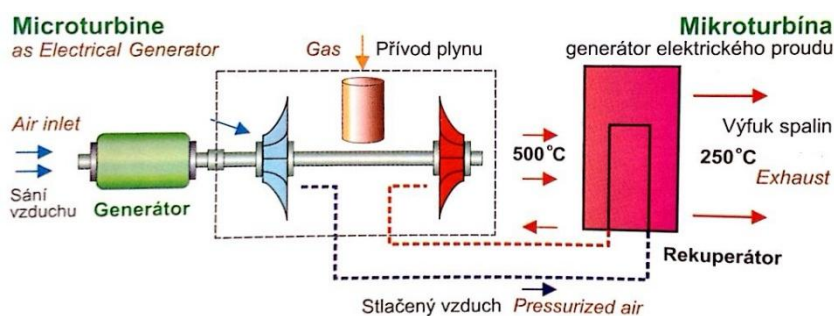
MT může dále obsahovat:

- Plynový kompresor:

Mikroturbíně musí být do spalovací komory dodáván plyn pod tlakem 0,4-0,8 MPa. Protože tlak střednětlakého rozvodu, který je v ČR u odběratele, činí pouze 0,3 MPa, bývá plyn čerpán kompresorem. Z hlediska bezpečnosti musí být na vstupu do MT dvě uzavírací bezpečnostní armatury, filtr, pojišťovací ventil a další opatření dle norem a výrobce. Vzhledem k pracovnímu mediu jsou zde zvýšené elektrické nároky.[3].

- Rekuperátor:

Rekuperátor je výměník tepla využívající odpadní teplo, kterým se ohřívá nasávaný, studený vzduch předtím, než dojde k jeho smíchání s palivem a vzniku směsi (obr. 6). Toto zařízení výrazně zvyšuje elektrickou účinnost a tím pádem snižuje spotřebu. Kromě toho má rekuperátor pozitivní dopad na množství vypouštěných oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ) [6].



Obr. 6: Schéma obvodu rekuperátoru [3]

- Spalinový výměník

Opět využívá odpadní teplo mikroturbíny na ohřev vody, která může být dále využita například k vytápění [5].

- Obtokový komín

U kogenerační jednotky slouží k odvedení spalin z MT přímo do ovzduší. V případě, že nevyužijeme odpadní teplo, nemusí jít spaliny přes výměník, který by se v důsledku prudké změny teploty mohl poškodit [5].

### 2.2.1 Odvod energie do sítě

V České republice pracuje rozvodná síť nízkého napětí na frekvenci 50 Hz a napětí 230/400 V. Provozní otáčky mikroturbín se však pohybují okolo 1600 Hz a proto je potřeba je upravit. K tomu nedochází mechanicky, ale v elektronické převodovce (frekvenční měnič). V ní se výstup z generátoru nejdříve usměrní a následně se střídačem upraví na potřebný kmitočet 50 Hz. Tato převodovka má účinnost 95 %. Usměřňovač a střídač tvoří výkonovou elektroniku turbíny. Hlavními výhodami tohoto typu převodovky je možnost používat ji i v takto vysokých otáčkách a plynulá regulace. Což znamená možnost neustálého dodávání energie i při změně výkonu [3].

Protože velké elektrárny vyrábí energii často daleko od míst spotřeby, doprovází tento přenos energie ztráty, které jsou 5-8 %. I přesto, že centralizovaný energetický systém zůstane rozhodujícím, je potřeba mít tento fakt na paměti [3].

### 2.2.2 Výhody MT oproti spalovacím motorům

Hlavní výhodou je jednoduchost. MT samotná má většinou jediný pohyblivý díl. Díky vysokým otáčkám odpadá mechanická převodovka a tím pádem i starost o provozní kapaliny. Jedná se tedy o provozně levné a ekonomicky šetrné řešení [5]. Absence převodovky znamená snížení hluku, hmotnosti i celkových rozměrů. Což umožňuje umístění MT i do menších a hůře přístupných prostorů.

Aby bylo zařízení firmy Capstone schopné dosáhnout požadovaných otáček, je hřídel uložena do vzduchových ložisek. Takováto ložiska jsou mazána vrstvou vzduchu, a proto není potřeba

doplňovat olej. To dále snižuje náklady na údržbu a zvyšuje spolehlivost celku. Je však potřeba zmínit, že ne všechny MT využívají vzduchových ložisek [5].

Pravidelný otáčivý pohyb turbíny je vhodnější, než vratný pohyb motoru. Palivo se u turbíny zapaluje při startu. Poté je již stabilní a dobře regulovatelné. Emise jsou tím pádem výrazně nižší, než u spalovacích motorů. Proto lze využít tepla spalín velice efektivně. Je totiž možné je použít přímo k dalším procesům, bez nutnosti jejich filtrace. A to bez ohrožení zdraví personálu. Nezanedbatelný je i fakt, že mikroturbíny se neustále vyvíjejí. Firma Capstone uvedla, že bude schopná v reálném čase dosáhnout jejich elektrické účinnosti 45 %. To by znamenalo ztrátu výhody vyšší účinnosti u spalovacích motorů [3].

### **2.2.3 Palivo**

Mikroturbíny mohou pracovat na zemní plyn, bioplyn, propan a butan a další. V České republice je základním palivem zemní plyn. Velký potenciál má však využití bioplynu, který je produktem chemických procesů. Základem těchto procesů jsou živočišné či rostlinné látky, jejichž produktem je právě bioplyn. Ten má obsah metanu 50-70 % a je ho tak možné použít ke spalování v MT. Rozšířenost biostanic je v České republice velká. Místo MT se však zatím v drtivé většině z nich používá spalovacích motorů [3].

### **2.3 Kogenerace**

Kogenerace je společná výroba tepelné a elektrické energie. Toho se využívá například v teplárnách, kde slouží vodní pára k pohonu parní turbíny, čímž vzniká elektřina. Pára je však také využita pro ohřev vody. Ta je využita koncovým uživatelem[11].

Pro úplnost je uveden i proces zvaný trigenerace. Což je současná výroba energie, tepla i chladu.

### **2.4 Zkoumaný energeticky náročný proces**

Průmyslová údržba prádla znamená údržbu stovek kilogramů prádla denně. Praní, následné sušení a případné žehlení takového množství prádla vyžaduje vyšší množství energie. Z toho důvodu je možné označit tento proces za energeticky náročný. MT používaná v LENP by v tomto procesu měla být využívána k dodávkám tepelné a elektrické energie právě do procesu průmyslové údržby praní prádla.

#### **2.4.1 Praní**

Pro praní prádla slouží v LENP celkem 5 vsádkových praček (obr. 7). Ty jsou schopny pojmout suché prádlo o celkové hmotnosti 92 kg. Pro ohřev vody v pračkách slouží pára, která je dodávána z parního kotle.

#### **2.4.2 Sušení**

Po dokončení praní je většina prádla transportována do bubnového sušiče (obr. 8). LENP je vybaveno celkem třemi kompaktními sušiči, z nichž každý využívá jiného zdroje tepla (pára, plyn a elektřina). Po vložení do bubnu je prádlo rozvolněno a zahříváno teplým vzduchem. Tím začne docházet k cílenému vypařování vlhkosti z prádla. Sušicím médiem je ohřátý vzduch, který se v důsledku odpařování vlhkosti z prádla ochlazuje a dál pokračuje do odtahu. Tím dochází k postupnému odstraňování vlhkosti. Pro závěrečnou úpravu prádla a odstranění zbývajících vlhkostí zde slouží žehlicí lis nebo válcový žehlič.



Obr. 7: Vsádkové pračky v LENP



Obr. 8: Sušič Primus T24G

### 3 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ

Jak bylo zmíněno v kapitole 2.4, MT by měla dodávat formou spalín energii do některých zařízení, kterými je LENP vybavena (pračky, sušič) nebo které by zde mohly sloužit (tepelný výměník na ohřev vody). Nabízí se tak různé varianty, na jaký produkovaný elektrický výkon MT nastavit a k čemu využívat spaliny. Nejdříve je však potřeba provést měření některých údajů, na jejichž základě budou provedeny technické výpočty. Ty následně slouží jako podklad pro kalkulaci nákladů a úspor pro zapojení, které je dále navrženo.

#### 3.1 Realizace měření a naměřené hodnoty

Měření provozu plynové mikroturbíny probíhalo na modelu Capstone C30 v LENP. Elektrický výkon byl pro první měření nastaven na řídicím panelu MT na hodnotu 5 kW. Část elektrické energie je odebírána kompresorem zemního plynu, který tak snižuje elektrickou účinnost. Po zapnutí MT je nejdříve hřídel roztočena elektromotorem na potřebné otáčky a až po jejich dosažení je v komoře zažehnuta směs zemního plynu se vzduchem. Aby bylo dosaženo stabilních, a tedy relevantních hodnot pro měření, bylo potřeba dosáhnout přibližně ustálené teploty spalín. Proto bylo po spuštění potřeba nechat zařízení v chodu zhruba 30 minut, aby se stabilizovala teplota spalín. Pro každý měřený výkon byly v intervalu dvou minut provedeny tři série měření. Tato měření zahrnují informace o výkonu turbíny, teplotě spalín, stavu plynoměru, atmosférickém tlaku, teplotě v laboratoři, relativní vlhkosti vzduchu v laboratoři a rozdílu tlaků na Prandtlově trubici. Ten nám slouží jako podklad pro výpočet rychlosti, s jakou spaliny proudí v potrubí.

Kromě údajů uvedených v tab. 3.1-3.5 bylo analyzátořem spalín měřeno množství některých látek, které jsou obsaženy ve spalínách. Z daných měření stojí za zmínku údaj o procentuálním zastoupení kyslíku ve spalínách. Tato hodnota se pohybuje okolo 18,5 %. Přičemž pro dýchání člověka musí vzduch obsahovat alespoň 15 % kyslíku.

##### 3.1.1 Měřicí technika

Pro měření byla použita následující technika:

- Odporový snímač teploty (obr. 9)
- Prandtlova trubice (obr. 10)
- Manometr (obr. 11)
- Plynoměr
- Vlhkoměr
- Analyzátoř elektrické sítě
- Analyzátoř spalín



Obr. 9: Odporový snímač teploty SENSIT PTS 65



Obr. 10: Převodníky diferenciálního tlaku Prandtlovy trubice



Obr. 11: Manometry pro měření přetlaku v plynovém potrubí

### 3.1.2 Naměřené hodnoty

Postupně se měřily údaje pro elektrické výkony 5 kW (tab. 3.1), 10kW (tab. 3.2), 15kW (tab. 3.3), 20kW (tab. 3.4) a 25kW (tab. 3.5). Dále se měřil pomocí Prandtlovy trubice rozdíl tlaků  $\Delta p_i$ , teplota spalin  $t_i$ , spotřeba zemního plynu  $V_i$ , atmosférický tlak  $p_i$  a teplota v laboratoři  $t_{iL}$ . Index  $i$  udává v celé této práci nastavený elektrický výkon. Výstupem těchto měření jsou následující tabulky, které obsahují naměřené parametry potřebné k dalším výpočtům.



	Výkon $P_5$ [kW]	$\Delta p_5$ [Pa]	Teplota $t_5$ [°C]	Stav plynoměru [m <sup>3</sup> ]	Spotřeba za 4 min. $V_5$ [m <sup>3</sup> ]	Atm. tlak $p_5$ [kPa]	Teplota v laboratoři $t_{5L}$ [°C]
1. odečet	4,85	6,22	232,82	38,686	0,31	97,90	22,46
2. odečet	4,86	6,17	234,55	38,842		97,90	22,57
3. odečet	4,88	6,09	235,95	38,996		97,91	22,57
ø	4,86	6,16	234,44			97,90	22,53

Tab. 3.1: Měření pro výkon 5 kW

	Výkon $P_{10}$ [kW]	$\Delta p_{10}$ [Pa]	Teplota $t_{10}$ [°C]	Stav plynoměru [m <sup>3</sup> ]	Spotřeba za 4 min. $V_{10}$ [m <sup>3</sup> ]	Atm. tlak $p_{10}$ [kPa]	Teplota v laboratoři $t_{10L}$ [°C]
1. odečet	9,89	9,29	257,45	40,072	0,447	97,92	22,67
2. odečet	9,87	9,27	259,01	40,294		97,93	22,67
3. odečet	9,87	9,18	259,88	40,519		97,93	22,67
ø	9,88	9,25	258,78			97,93	22,67

Tab. 3.2: Měření pro výkon 10 kW

	Výkon $P_{15}$ [kW]	$\Delta p_{15}$ [Pa]	Teplota $t_{15}$ [°C]	Stav plynoměru [m <sup>3</sup> ]	Spotřeba za 4 min. $V_{15}$ [m <sup>3</sup> ]	Atm. tlak $p_{15}$ [kPa]	Teplota v laboratoři $t_{15L}$ [°C]
1. odečet	14,90	11,35	276,16	42,022	0,594	97,95	22,77
2. odečet	14,95	11,38	276,89	42,313		97,95	22,77
3. odečet	14,95	11,14	277,46	42,616		97,95	22,87
ø	14,93	11,29	276,8367			97,95	22,80

Tab. 3.3: Měření pro výkon 15 kW

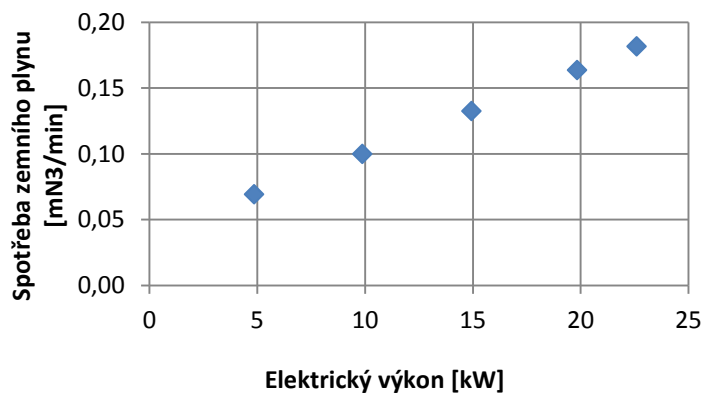
	Výkon $P_{20}$ [kW]	$\Delta p_{20}$ [Pa]	Teplota $t_{20}$ [°C]	Stav plynoměru [m <sup>3</sup> ]	Spotřeba za 4 min. $V_{20}$ [m <sup>3</sup> ]	Atm. tlak $p_{20}$ [kPa]	Teplota v laboratoři $t_{20L}$ [°C]
1. odečet	19,91	13,01	291,36	44,469	0,733	97,97	22,97
2. odečet	19,80	13,03	292,09	44,836		97,97	22,97
3. odečet	19,82	12,95	292,66	45,202		97,97	22,97
ø	19,84	13,00	292,0367			97,97	22,97

Tab. 3.4: Měření pro výkon 20 kW

	Výkon $P_{25}$ [kW]	$\Delta p_{25}$ [Pa]	Teplota $t_{25}$ [°C]	Stav plynoměru [m <sup>3</sup> ]	Spotřeba za 4 min. $V_{25}$ [m <sup>3</sup> ]	Atm. tlak $p_{25}$ [kPa]	Teplota v laboratoři $t_{25L}$ [°C]
1. odečet	22,64	13,59	302,26	47,321	0,814	97,99	23,07
2. odečet	22,59	13,65	302,72	47,881		97,99	23,17
3. odečet	22,59	13,50	302,83	48,135		97,99	23,17
ø	22,61	13,58	302,6033			97,99	23,14

Tab. 3.5: Měření pro výkon 25 kW

Z grafu na obr. 12 je možné říci, že pro měřené elektrické výkony je nárůst spotřeby paliva lineární.



Obr. 12: Graf závislosti spotřeby zemního plynu na výkonu



### 3.2 Určení elektrické, tepelné a celkové účinnosti pro výkon 5 kW

Pro výpočet elektrické účinnosti je potřeba spočítat energii obsaženou v zemním plynu  $Q_{ZEMNI\_PLYN\_5}$  (1), kde index 5 značí přibližný elektrický výkon v kW.

$$Q_{ZEMNI\_PLYN\_5} = LHV \cdot V_{5S} \quad (1)$$

Protože  $LHV=35812 \text{ kJ/m}^3$  udává dodavatel zemního plynu pro normální fyzikální podmínky, které jsou odlišné od podmínek měření, je potřeba dle vztahu (2) přepočítat objem zemního plynu pro normální podmínky a poté znovu dosadit do rovnice (3). Tyto normální podmínky jsou:

$$p_S=101325 \text{ Pa}; T_S=273 \text{ K}$$

Dále je potřeba znát teplotu a tlak zemního plynu v potrubí  $T_{ZEMNI\_PLYN}$  a  $p_{PRETLAK\_i}$ .

$$T_{ZEMNI\_PLYN}=285,6 \text{ K}; p_{PRETLAK\_5}=2200 \text{ Pa}; p_{PRETLAK\_10}=2100 \text{ Pa}; p_{PRETLAK\_15}=2000 \text{ Pa}; p_{PRETLAK\_20}=1900 \text{ Pa}; p_{PRETLAK\_25}=1900 \text{ Pa}$$

$$\begin{aligned} \frac{p_S \cdot V_{5S}}{T_S} &= \frac{(p_S + p_{PRETLAK\_5}) \cdot V_5}{T_{ZEMNI\_PLYN}} \rightarrow V_{5S} = \frac{(p_S + p_{PRETLAK\_5}) \cdot V_5 \cdot T_S}{T_{ZEMNI\_PLYN} \cdot p_S} = \\ &= \frac{(97900 + 2200) \text{ Pa} \cdot 0,31 \text{ m}^3 \cdot 273 \text{ K}}{285,6 \text{ K} \cdot 101325 \text{ Pa}} = 0,292 \text{ m}^3 / 4 \text{ min} = 0,073 \text{ m}^3 / \text{min} \end{aligned} \quad (2)$$

$$Q_{ZEMNI\_PLYN\_5} = LHV \cdot V_{5S} = 35812 \text{ kJ/m}^3 \cdot 0,073 \text{ m}^3 / \text{min} = 43720 \text{ J/s} = 43720 \text{ W} \quad (3)$$

Elektrickou účinnost  $\eta_{EL\_5}$  nyní dostaneme dosazením do vzorce (4):

$$\eta_{EL\_5} = \frac{P_5}{Q_{ZEMNI\_PLYN\_5}} = \frac{4,86 \text{ kW}}{43,720 \text{ kW}} = 11,1\% \quad (4)$$

Pro určení tepla ve spalínách  $Q_{SPALINY\_5}$  je vycházeno z naměřených hodnot. Kromě toho je potřeba znát měrnou tepelnou kapacitu spalín zemního plynu. Ta se mění s teplotou spalín a zároveň závisí na přesném složení plynu. Naměřené teploty spalín ovlivňují měrnou tepelnou kapacitu pouze v řádech desetin procent, proto je použita konstantní hodnota  $c_S=1,04 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$  [12].

Protože objem spalín potřebný pro výpočet objemu tepla ve spalínách je závislý na jejich hustotě, je potřeba spočítat nejdříve hustotu  $\delta_5$  spalín. Ze změřených hodnot je možné spočítat hustotu pomocí stavové rovnice (5). Po jejím upravení do tvaru (6) vyjde hustota pro konkrétní teplotu a tlak. Pro zjednodušení bude tlak v potrubí roven tlaku atmosférickému.  $R$  je univerzální plynová konstanta. Přesná hodnota molární hmotnosti  $M$  spalín je nahrazena molární hmotností vzduchu, jehož je při spalování přebytek a jehož složení je velmi podobné složení spalín.

$$p \cdot M = \rho \cdot R \cdot T \quad (5)$$

Z této rovnice se tedy může vyjádřit hustotu spalín  $\rho_5$ :

$$\rho_5 = \frac{p_5 \cdot M}{R \cdot t_5} = \frac{97900 \text{ Pa} \cdot 0,0289 \text{ kg/mol}}{8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \cdot (273,15 + 234,44) \text{ K}} = 0,672 \text{ kg/m}^3 \quad (6)$$

Pro určení rychlosti  $v_5$  proudění spalín v odtahovém potrubí je využit vztah (7), kde figuruje rozdíl dynamického a statického tlaku v Prandtlově trubici  $\Delta p_5$  a vyjádřená hustota:

$$v_5 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_5}{\rho_5}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,16 \text{ Pa}}{0,672 \text{ kg/m}^3}} = 4,28 \text{ m/s} \quad (7)$$

V předchozích rovnicích bylo vyjádřeno téměř vše potřebné pro výpočet tepelného toku spalín. Posledním neznámým parametrem je vnitřní průměr potrubí  $D=0,3$  m. Je tedy možné dosadit do rovnice  $Q_{\text{SPALINY}_5}$ , která vyjadřuje teplo ve spalínách (8).

$$Q_{\text{SPALINY}_5} = \rho_5 \cdot V_5 \cdot c_s \cdot t_5 = \rho_5 \cdot v_5 \cdot S \cdot c_s \cdot \Delta t_5 = \rho_5 \cdot v_5 \cdot \frac{\Pi \cdot D^2}{4} \cdot c_s \cdot (t_5 - t_{5L}) \quad (8)$$

$$Q_{\text{SPALINY}_5} = 0,672 \text{ kg/m}^3 \cdot 4,28 \text{ m/s} \cdot \frac{\Pi \cdot 0,3^2}{4} \text{ m}^2 \cdot 1004 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot (234,44^\circ\text{C} - 22,53^\circ\text{C}) = \\ = 43243,8 \text{ J/s}$$

Tepelná účinnost se spočítá dle vztahu (9):

$$\eta_{5T} = \frac{Q_{\text{SPALINY}_5}}{Q_{\text{ZEMNI\_PLYN}_5}} = \frac{43,243,8 \text{ kW}}{43,720 \text{ kW}} = 98,9\% \quad (9)$$

Celková účinnost se spočítá dle vztahu (10):

$$\eta_5 = \frac{P_5 + Q_{\text{SPALINY}_5}}{Q_{\text{ZEMNI\_PLYN}_5}} = \frac{4,86 \text{ kW} + 43,243,8 \text{ kW}}{43,720 \text{ kW}} = 110,0\% \quad (10)$$

Vzhledem k tomu, že se samotná tepelná účinnost pohybuje okolo 100 %, tepelná i celková účinnost jsou nereálné. Spočítají se proto účinnosti i pro další elektrické výkony. Pokud znovu vyjdou podobně vysoké hodnoty tepelné účinnosti (tab. 3.6), je možné konstatovat, že došlo k chybě i v dalších měřeních.

### 3.3 Účinnosti pro další měřené výkony

Jedná se o sérii stejných výpočtů, které již byly provedeny pro výkon 5 kW. Proto jsou uvedeny pouze výsledky (tab. 3.6), které shrnují informace pro další měřené elektrické výkony podle vztahů (1-10). V tabulce jsou pro srovnání uvedeny i elektrické účinnosti dle firmy Capstone, které byly čerpány z jejich technického listu [13].

Přibližný elektrický výkon	5 kW	10 kW	15 kW	20 kW	25 kW
Elektrická účinnost spočítaná $\eta_{EL\_i}$ [%]	11,1	16,6	18,9	20,3	20,9
Elektrická účinnost dle výrobce [%]	15,2	20,6	23,2	24,9	25,7
Tepelná účinnost spočítaná $\eta_{iT}$ [%]	99,0	96,6	85,1	77,3	73,3

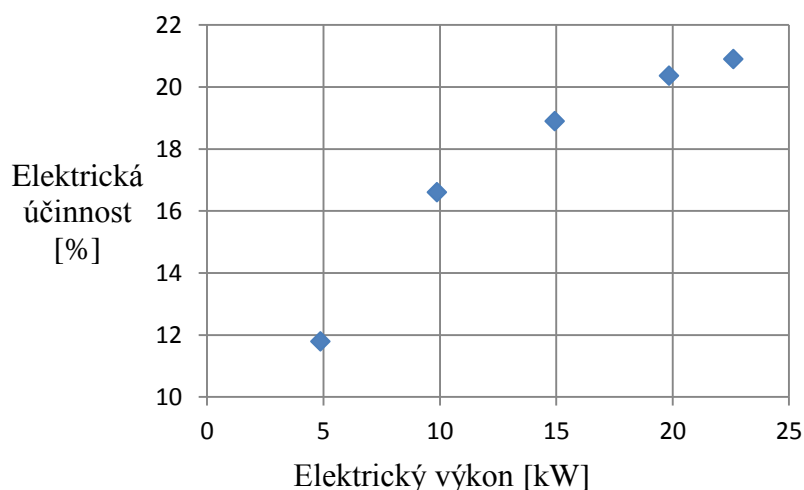
Tab. 3.6: Vypočtené účinnosti pro různé výkony

Spočítaný elektrický výkon se od výkonu udávaného výrobcem liší. Důvodem jsou odlišné podmínky měření (teplota, tlak a vlhkost okolí). Při jednom a tom samém nastavení elektrického výkonu se tak dá dosáhnout různé elektrické účinnosti. Tab. 3.7 pro představu udává normální podmínky udávané výrobcem [M] a podmínky, za kterých se měřilo v laboratoři.

	Teplota [°C]	Tlak [kPa]	Vlhkost [%]
Podmínky výrobce	15	101,325	60
Podmínky v laboratoři	22,53	97,90	22,98

Tab. 3.7: Normální a laboratorní podmínky měření

Z vypočtených výsledků elektrické účinnosti je sestaven graf na obr. 13, podle něhož se snižujícím elektrickým výkonem klesá i elektrická účinnost.



Obr. 13: Závislost elektrické účinnosti na elektrickém výkonu

### 3.4 Chyba měření

Z tab. 3.6 je patrné, že tepelná účinnost je nereálná téměř pro všechny měřené výkony. Ve třech případech by MT vyprodukovala více energie, než jí bylo dodáno v zemním plynu. A i v dalším případě přesahuje celková účinnost reálné hodnoty. Vzhledem k tomu, že již není možné provést nová měření, jsou všechny hodnoty o energii ve spalínách nahrazeny. K tomu byl využit technický list MT [13], z něhož byly čerpány hodnoty o energiích ve spalínách

$Q_{VYROBCE_i}$  a toku spalin  $m_i$ , které jsou uvedeny v tab. 3.8. Vypočítané údaje o energiích ve spalinách jsou tedy nahrazeny údaji od výrobce. Nahrazením již však přesně neodráží podmínky v laboratoři. Přesto bylo rozhodnuto o využití těchto dat, jelikož jde o jediné, v danou chvíli dostupné, podklady pro navazující výpočty. Se zavedenou nepřesností je nutné do budoucna počítat a provést nová, přesnější měření. Pro vyjádření nových účinností závislých na  $Q_{VYROBCE_i}$  byly využity vztahy 3.9 a 3.10. Všechny tyto údaje a informace o hmotnostním toku spalin jsou uvedeny v tab. 3.8 [13].

Přibližný výkon	5 kW	10 kW	15 kW	20 kW	25 kW
Energie ve spalinách $Q_{ZEMNI\_PLYN_i}$ [W]	43720	57490	67224	75368	79289
Energie ve spalinách dle výrobce $Q_{VYROBCE_i}$ [W]	28925	40442	51871	63593	76492
Tepelná účinnost dle energií ve spalinách od výrobce [%]	70,1	68,0	65,6	65,2	65,8
Celková účinnost dle energií ve spalinách od výrobce [%]	77,3	84,5	84,5	85,5	91,7
Hmotnostní tok dle výrobce $m_i$ [kg/s]	0,141	0,182	0,213	0,245	0,277

Tab. 3.8: Shrnutí účinností spočítaných na základě výrobcem udávané energie ve spalinách.

### 3.5 Nalezení chyby a její řešení

Chyba nastala pravděpodobně při měření některé z hodnot potřebných pro výpočet tepla ve spalinách. V tab. 3.6 jsou vedle sebe položeny hodnoty spočítané elektrické účinností s hodnotami udávanými výrobcem. Tyto hodnoty spolu korespondují. Proto je možné považovat naměřené hodnoty za věrohodné. Naopak z tab. 3.8 je zřejmé, že spočítané energie ve spalinách zdaleka nesedí s údaji od výrobce. Je tedy potřeba podívat se na měřené hodnoty související s tepelnou účinností. To je pro výkon 5 kW provedeno v následujících podkapitolách. Každá z tabulek obsahuje na prvním řádku reálně naměřenou nebo zvolenou hodnotu, která mohla ovlivnit výsledek (označena červeně). Dále tento řádek obsahuje jednu hodnotu vyšší a jednu hodnotu nižší. Druhý řádek tabulky obsahuje údaj o tepelné účinnosti vyjádřené v procentech, která je závislá na údaji prvního řádku. Třetí řádek říká, jak změnit naměřenou/zvolenou hodnotu, aby bylo dosaženo, při zachování ostatních parametrů, dosaženo tepelné účinnosti 70%.

#### 3.5.1 Chyba v měření tlaku

Tlak na odtahu z turbíny by musel být snížen na 45 % oproti naměřenému atmosferickému tlaku. Je tedy nepravděpodobné, že by se jednalo o chybné měření. Teoretické nové účinnosti při změně daného parametru jsou uvedeny v tab. 3.9.

Tlak spalin změněn na [kPa]	87,9	97,9	107,9
Tepelná účinnost [%]	99,2	104,7	110,0
Pro tepelnou účinnost 70 % je potřeba	Snížit původní tlak na 45%		

Tab. 3.9: Změna pro atmosférický tlak

### 3.5.2 Chyba v měření teploty

Protože byla teplota v potrubí měřena dvěma přístroji a tyto teploty spolu korespondovaly, je možné považovat měření za věrohodné. Teoretické nové účinnosti při změně daného parametru jsou uvedeny v tab. 3.10.

Teplota spalin změněna na [°C]	150	234,4	300
Tepelná účinnost [%]	69	104,7	129
Pro tepelnou účinnost 70% je potřeba	Snížit původní teplotu na 70%		

Tab. 3.10: Změna pro teplotu

### 3.5.3 Chyba v měření tlaku v Prandtlově trubici

Výsledky tohoto měření mohl ovlivnit průměr potrubí, ve kterém bylo měření prováděno. Je tedy možné, že chyba nastala zde. Teoretické nové účinnosti při změně daného parametru jsou uvedeny v tab. 3.11.

Rozdíl tlaku v Prandtlově trubici změněn na [Pa]	3	6,16	9
Tepelná účinnost [%]	73	104,7	126,6
Pro tepelnou účinnost 70% je potřeba	Snížit původní rozdíl tlaků na 46%		

Tab. 3.11: Změna tlaků v Prandtlově trubici

### 3.5.4 Chyba v určení molární hmotnosti

Molární hmotnost nebyla počítána z přesného složení spalin. Vycházelo se z obecně udávaných tabelovaných hodnot. Přesto nelze očekávat výraznou nepřesnost. Pro dosažení účinnosti 70 % by se musela molární hmotnost snížit o 80 %. Teoretické nové účinnosti při změně daného parametru jsou uvedeny v tab. 3.12. Proto je zde chyba vyloučena.

Molární hmotnost spalin změněna na [g/mol]	10	28,96	40
Tepelná účinnost [%]	61,5	104,7	123,1
Pro tepelnou účinnost 70% je potřeba	Snížit původní molární hmotnost na 45%		

Tab. 3.12: Změna molární hmotnosti spalin

### 3.5.5 Chyba v určení měrné tepelné kapacity

Jak již bylo zmíněno, naměřené teploty spalin v daném rozsahu nemají velký vliv na měrnou tepelnou kapacitu. Složení zemního plynu by tak na ni muselo mít zásadní vliv. Teoretické nové účinnosti při změně daného parametru jsou uvedeny v tab. 3.13.

Měrná tepelná kapacita spalin změněna na [kJ/kg·°C]	1,1	1,004	0,9
Tepelná účinnost [%]	114,8	104,7	93,9
Pro tepelnou účinnost 70 % je potřeba	Snížit původní měrnou tepelnou kapacitu na 67 %		

Tab. 3.13: Změna měrné tepelné kapacity spalin

### 3.5.6 Chyba v měření průtoku zemního plynu

Pro tepelnou účinnost by musel měřák spotřeby zemního plynu měřit s chybou 126 %, proto je tato chyba považována za nepravděpodobnou. Teoreticky nové účinnosti při změně daného parametru jsou uvedeny v tab. 3.14.

Průtok zemního plynu [m3]	0,25	0,31	0,4
Tepelná účinnost [%]	129,9	104,7	81,2
Pro tepelnou účinnost 70 % je potřeba	Zvýšit původní průtok plynu o 48 %		

Tab. 3.14: Změna v průtoku zemního plynu do MT

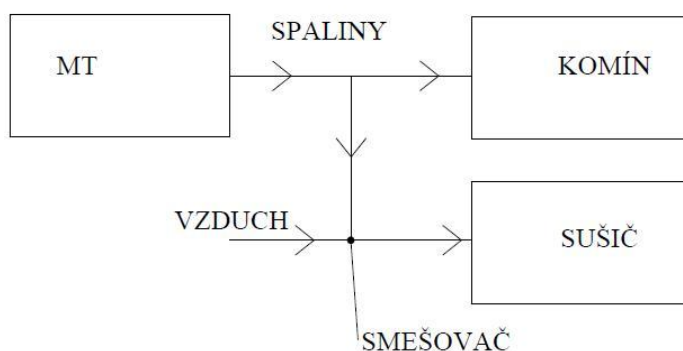
Prandtlůva trubice měří správně pouze v určitém rozsahu průtoků. Pokud se měřené hodnoty od tohoto rozsahu vzdalují, roste chyba měření. Proto taky podle tab. 3.8 se zvyšujícím se výkonem klesala nepřesnost měření. Chyba tedy nastala při měření Prandtlůvou trubicí. Další měření již není provedeno, a tak jsou za směrodatné považovány účinnosti spočítané na základě energií ve spalinách udávaných výrobcem.

## 4 NÁVRHY VYUŽITÍ MT

Po předchozí kapitole, která se zabývala výpočtem parametrů spalín vycházejících z MT, přichází kapitola obsahující 2 možné návrhy využití těchto spalín v rámci LENP.

### 4.1 Využití spalín při výkonu 5 kW na sušení prádla

Elektrický výkon MT byl zvolen vzhledem k potřebnému výkonu sušiče. Ten činí u modelu Primus T24G  $P_{\text{SUSIC}}=33$  kW [14]. Takové množství tepla obsahují spaliny při elektrickém výkonu MT těsně pod hranici 7 kW [13]. Tento výkon nebyl součástí měření, a tak budou použity údaje z měření, kdy byl výkon  $P_5=5$  kW. Zbytek tepla tak je dodáván plynovým hořákem, který je součástí sušiče. Což bude zohledněno v kalkulaci úspor. Teplota spalín  $t_5$  je pro proces sušení prádla příliš vysoká. Z tohoto důvodu dochází před jejich vstupem do sušiče k míchání plynů (spaliny + vzduch) ve směšovači (obr. 14). Přívod teplého vzduchu do sušiče musí být opatřen klapkou, protože sušič pracuje v cyklech. Ve chvíli, kdy je prádlo nakládáno/vykládáno, by byly spaliny odváděny obtokovým komínem.



Obr. 14: Schéma zapojení pro kapitolu 4.1

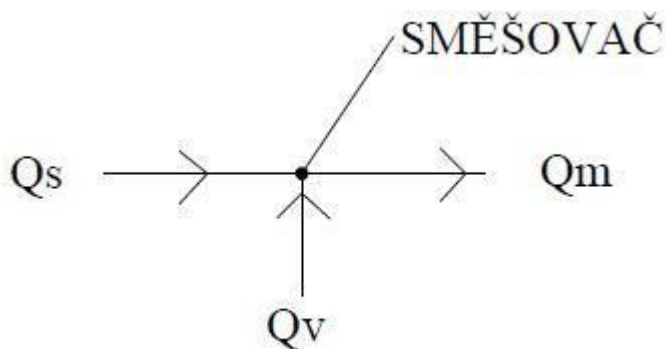
Z měření MT je známa teplota spalín i nasávaného vzduchu. Není ale možné použít spočítanou hodnotu objemového průtoku, protože podle tab. 3.11 vyšla chybná hodnota  $\Delta p_i$ , na které byly objemové průtoky spalín závislé. Z tohoto důvodu je opět využita tab. 3.8, ve které je uveden hmotnostní průtok převzatý od výrobce. Ten sice platí pro konkrétní podmínky měření, které se od těch reálných budou mírně lišit. Nově spočítané hodnoty všem přece jen lépe reflektovat reálný stav. Hmotnostní tok spalín pro výkon 5 kW je  $m_5=0,141$  kg/s.

Objemový tok spalín se pak spočítá ze vztahu (11).

$$V_{\text{SN}} = \frac{m_5}{\rho_5} = \frac{0,141 \text{ kg/s}}{0,672 \text{ kg/m}^3} = 0,21 \text{ m}^3/\text{s} = 756 \text{ m}^3/\text{h} \quad (11)$$

$756 \text{ m}^3/\text{h}$  je tedy množství teplých spalín, které při daném elektrickém výkonu MT dodává. Z technického listu od výrobce bubnového sušiče je určený objemový průtok směsi spalín a vzduchu  $V_{\text{SUSIC}}=900 \text{ m}^3/\text{hod}$ . Teplota směsi vstupující do sušiče byla stanovena na  $t_{\text{SUSIC}}=150$  °C. Aby se dalo zjistit, jaké množství studeného vzduchu je potřeba nasát do směšovače, vyjádří se energetická bilance (12) a hmotnostní bilance (13) v tomto uzlu (obr. 15). Tyto rovnice budou psány pro hodnoty plynů za normálních podmínek. Je tak možné vykrátit hustoty všech členů u obou rovnic. Protože složení všech vstupujících i vystupujících plynů je podobné, je pro všechny plyny zvolena stejná měrná tepelná kapacita a mohou tak být v rovnici (12) vykráceny. Případná chyba ve výpočtu je zanedbatelná. Za

referenční teplotu v tomto měření je zvolena teplota  $t_{5L}=22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Neznámými hodnotami tak budou  $V_M$  a  $V_V$ .



Obr. 15 Uzel pro hmotnostní a energetickou bilanci pro kapitolu 4.1

$$\begin{aligned} Q_S + Q_V &= Q_M \\ V_{SP} \cdot (t_5 - t_{5L}) + V_V \cdot (t_{5L} - t_{5L}) &= V_M \cdot (t_{SUSIC} - t_{5L}) \\ V_{SP} \cdot (t_5 - t_{5L}) + 0 &= V_M \cdot (t_{SUSIC} - t_{5L}) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} m_S + m_V &= m_M \\ V_S + V_V &= V_M \end{aligned} \quad (13)$$

Pro neznámé  $V_M$  a  $V_V$  jsou sestaveny dvě rovnice. Je však potřeba ještě vyjádřit hodinový průtok spalin  $V_{5N}$  za normálních podmínek. To je provedeno v rovnici (14).

$$\begin{aligned} \frac{p_S \cdot V_{5N}}{t_5} &= \frac{p_S \cdot V_{SP}}{T_S} \rightarrow V_{SP} = \frac{p_S \cdot V_{5N} \cdot T_S}{t_5 \cdot p_S} \\ V_{SP} &= \frac{97900\text{Pa} \cdot 756\text{m}^3/\text{hod} \cdot 273\text{K}}{507\text{K} \cdot 101325\text{Pa}} = 393\text{m}^3/\text{hod} \end{aligned} \quad (14)$$

Rovnice (13) se tak dá rozšířit rovnicí (12). Výsledkem pak je (15).

$$\begin{aligned} V_{SP} \cdot (t_5 - t_{5L}) &= (V_S + V_V) \cdot (t_{SUSIC} - t_{5L}) \\ V_{SP} \cdot (t_5 - t_{5L}) &= (V_S + V_V) \cdot (t_{SUSIC} - t_{5L}) \\ V_{SP} \cdot (t_5 - t_{5L}) - V_S \cdot (t_{SUSIC} - t_{5L}) &= V_V \cdot (t_{SUSIC} - t_{5L}) \\ V_V &= \frac{V_{SP} \cdot (t_5 - t_{5L}) - V_S \cdot (t_{SUSIC} - t_{5L})}{(t_{SUSIC} - t_{5L})} \\ V_V &= \frac{393\text{m}^3/\text{hod} \cdot (234,4 - 22,5)^{\circ}\text{C} - 393\text{m}^3/\text{hod} \cdot (150 - 22,5)^{\circ}\text{C}}{(150 - 22,5)^{\circ}\text{C}} = 260\text{m}^3/\text{hod} \end{aligned} \quad (15)$$



Za normálních podmínek měření by bylo potřeba nasávat  $V_v=260 \text{ m}^3/\text{hod}$ , aby směs se spaliny dosáhla  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Kalkulace nákladů a výnosu je pro následující podmínky udělaná v tab. 4.1.

- nákupní cena plynu  $12 \text{ Kč/m}^3$
- nákupní cena elektřiny  $4 \text{ Kč/kWh}$

#### Použité vzorce pro kalkulaci úspor:

Zemní plyn pro MT = Spotřeba zemního plynu za normálních podmínek · Nákupní cena zemního plynu · Čas

Vyprodukovaná elektrická energie = Výkon · Nákupní cena elektřiny · Čas

Úspora zemního plynu u sušiče = Výkon ohřevu · Nákupní cena zemního plynu · Čas –  
Přídavný ohřev hořákem · Nákupní cena zemního plynu · Čas

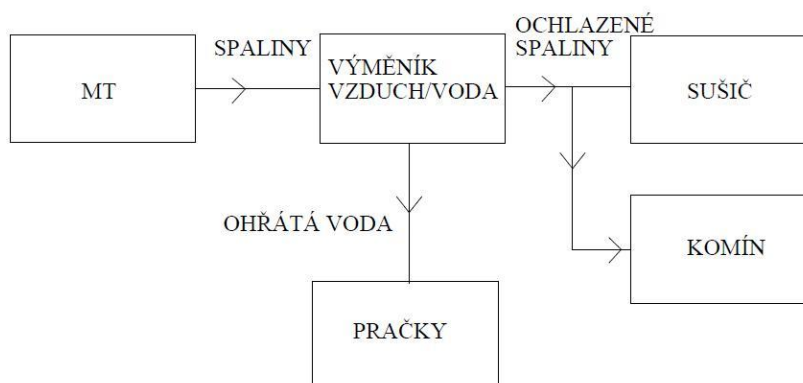
Cena spotřebovaného plynu v MT [Kč/hod]	-55,8
Vyprodukovaná elektrická energie [Kč/hod]	19,5
Úspora zemního plynu u sušiče [Kč/hod]	34,6
Úspora [Kč/hod]	-1,7

Tab. 4.1: Kalkulace úspor pro 5 kW

V této sestavě je mikroturbína ztrátová. Ztráta činí  $1,7 \text{ Kč/hod}$ . Zapojení tak nemá smysl a je výhodnější k ohřevu vzduchu využít plynový hořák

#### 4.2 Využití spalin při výkonu 25 kW

S rostoucím elektrickým výkonem roste i celková účinnost, je tedy nejvýhodnější maximální možný výkon. Z tohoto důvodu bude kalkulace v kapitole 4.2.1 provedena pro maximální dosažený výkon při měření. Což je  $22,6 \text{ kW}$ . Pro stanovený výkon MT je potřeba najít využití pro spaliny. V tomto procesu jsou veškeré spaliny z MT odváděny potrubím na tepelný výměník, kde se ohřívá voda pračkám. Díky tomu klesne teplota. Ochlazené spaliny jsou pak smíchány se studeným vzduchem. Tato směs je pak nasávána do sušiče (obr. 16). Přívod teplého vzduchu do sušičky musí být i zde opatřen klapkou a komínem, protože sušička pracuje v cyklech.



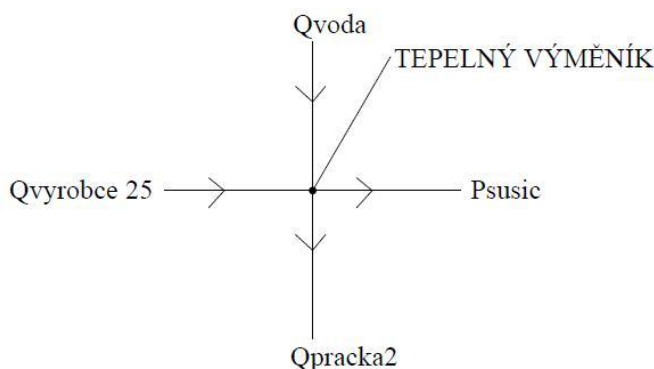
Obr. 16 Schéma zapojení pro výkon 25 kW

Uvažované množství vypraného prádla za 8 hodin je 500 kg. Z toho byl stanoven počet cyklů jednotlivých praček a následně i celkové množství tepla spotřebované za 8 hodin (tab. 4.2). Množství energie potřebné pro jedno praní jsou známy díky zkušenostem z LENP.

Pračka č.	Kapacita pračky [kg]	Energie na 1 praní [MJ]	Počet praní za den	Energie dodaná pračkám za směnu $Q_{\text{PRAČKA}}$ [MJ]	Energie dodaná pračkám $Q_{\text{PRAČKA2}}$ [W]
1	24	60	6	1230	42708,3
2	24	60	5		
3	18	45	6		
4	18	45	5		
5	8	15	5		

Tab. 4.2: Shrnutí informací o pračkách v laboratoři

Sušič potřebuje ke svému provozu 33 kW. A celkové teplo ve spalínách je pro daný výkon podle tab. 3.8  $Q_{\text{VÝROBCE}_25}=76492$  W. Je tak možné udělat energetický uzel, na kterém je naznačeno vstupující a vystupující teplo (obr. 17). Podle něj se dá zjistit, zda obsahují spaliny dost tepla (16). Protože  $Q_{\text{PŘEBYTEK}}$  je kladné číslo, obsahují spaliny z MT dostatek tepla pro toto zapojení.  $Q_{\text{VODA}}=0$  za předpokladu, že teplota přiváděné vody k výměníku je shodná s teplotou  $T_{25L}$ .



Obr. 17 Uzel pro hmotnostní a energetickou bilanci pro kapitolu 4.2

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{PREBYTEK}} &= Q_{\text{VYROBCE\_25}} + Q_{\text{VODA}} - P_{\text{SUSIC}} - Q_{\text{PRACKA2}} \\
 Q_{\text{PREBYTEK}} &= 76492 \text{ W} + 0 - 33000 \text{ W} - 42708,3 \text{ W} \\
 Q_{\text{PREBYTEK}} &= 783,7 \text{ W}
 \end{aligned} \tag{16}$$

Následně se spočítá, kolik  $\text{m}^3$  zemního plynu  $V_{\text{ZEMNI\_PLYN}}$  obsahuje ekvivalentní množství tepla, které ohřívá vodu ve výměníku (17). Tento údaj je následně použit ke kalkulaci návratnosti. Protože by se pro ohřev vody pračkám využíval parní kotel, musí se počítat s jeho tepelnou účinností  $\eta_{\text{KOTEL}}=71\%$ . Ta byla zjištěna dlouhodobým využíváním v LENP.

$$V_{\text{ZEMNI\_PLYN}} = \frac{Q_{\text{PRACKA}}}{\text{LHV} \cdot \eta_{\text{KOTEL}}} = \frac{1230 \text{ MJ}}{35812 \text{ kJ/m}^3 \cdot 0,71} = 48,38 \text{ m}^3 \tag{17}$$

Je tedy možné provést kalkulaci nákladů a výnosů. Ta je provedena pro následující nákupní cenu zemního plynu a elektřiny.

- nákupní cena plynu 12 Kč/ $\text{m}^3$
- nákupní cena elektřiny 4 Kč/kWh

#### Použité vzorce pro kalkulaci úspor:

Zemní plyn pro MT = Spotřeba zemního plynu za normálních podmínek · Nákupní cena zemního plynu · Čas

Úspora na zemním plynu pro parní kotel =  $V_{\text{ZEMNI\_PLYN}} \cdot \text{Cena}$

Vyprodukovaná elektrická energie = Výkon · Nákupní cena elektřiny · Čas

Úspora zemního plynu u sušiče = Výkon ohřevu · Nákupní cena zemního plynu · Čas

Zemní plyn pro MT [Kč]	-1044,1
Úspora na zemním plynu pro parní kotel [Kč]	577,4
Vyprodukovaná elektrická energie [Kč]	723,4
Úspora zemního plynu u sušiče [Kč]	318,5
<b>Celková úspora [Kč/8 hodin]</b>	<b>577,4</b>

Tab. 4.3: Kalkulace úspor pro 25 kW

V tomto případě by se investice 2500000 Kč vrátila po 4330 směnách. Do této kalkulace opět nebyly zahrnuty náklady spojené s realizací (rozvody, tepelný výměník apod.). Vzhledem k tomu, že byla při tomto elektrickém výkonu spočítána celková účinnost 91,5 % a v navrženém zapojení byla využita většina tepla ze spalin, nedá se předpokládat, že by úspora mohla ještě výrazně růst. Při předpokládaném provozu dvou směn v týdnu by se tak investice vrátila po 41,6 letech. V případě provozu 5x týdně by byla návratnost 16,6 let.

## 5 ZÁVĚR

Tato práce by se dala rozdělit na tři části. První část je rešerší na téma plynová mikroturbína a má za úkol uvést čtenáře do této problematiky. Čtenář je seznámen s tím, jak mikroturbína pracuje, jaké je její využití, jaké jsou výhody a nevýhody v porovnání s jinými dostupnými technologiemi.

Další část se zaměřuje na realizaci měření, která jsou potřebná pro vyhodnocení ekonomičnosti plynové mikroturbíny. Vzhledem k tomu, že některé hodnoty nejsou měřeny přímo, je potřeba se k nim dostat nepřímo pomocí výpočtů. Jedním z takovýchto měření je průtok spalín v potrubí, jenž patří k důležitým znalostem procesního inženýra. V této práci je objemový průtok v potrubí počítán za pomoci Prandtlovy trubice. Při tomto měření ovšem došlo k chybě, proto byly hodnoty nahrazeny údaji z katalogu výrobce. Což mohlo mírně ovlivnit výsledky. V případě rozšíření této práce by proto bylo vhodné provést opětovné měření diferenciálního tlaku na Prandtlově trubici pro všechny výkony.

Třetí část uvažuje dva scénáře využití plynové mikroturbíny v rámci Laboratoře energeticky náročných procesů. Na základě měřených a vypočtených údajů určuje, jaká je teoretická návratnost investice do plynové mikroturbíny. Využití při elektrickém výkonu 5 kW a zapojení, které bylo zvoleno v kapitole 4.1, je nesmyslné, protože místo úspory vzniká ztráta. Pro navržené, efektivní využití spalín (elektrický výkon 25 kW), je hodinová úspora v provozu LENP 72,1 Kč. Při směnách trvajících 8 hodin, stabilních cenách za zemní plyn a elektrickou energii je tak návratnost MT 3877 směn (při dvou směnách týdně 37,3 let). Na navržených zapojeních se ukázalo, že maximální účinnost a návratnost má mikroturbína při maximálních výkonech. V části realizace by se do budoucna mohla práce zabývat například podrobnějším využitím výměníků tepla.

Součástí práce je i soubor Excel, v němž jsou prováděny výpočty z naměřených dat. Velkou roli zde hrají i nákupní ceny elektřiny a zemního plynu od dodavatele, které jsou významné při posuzování, zda má pro dané scénáře investice do mikroturbíny smysl.

## 6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] NETME Centre – Nové technologie pro strojírenství. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně [online]. [cit. 2014-01-10]. Dostupné z [www: <http://www.netme.cz/divize/PPE/nabidka-sluzeb/#ENP>](http://www.netme.cz/divize/PPE/nabidka-sluzeb/#ENP)
- [2] Whole building design guide. Microturbines [online]. [cit. 2014-01-13]. Dostupné z [www: <http://www.wbdg.org/resources/microturbines.php>](http://www.wbdg.org/resources/microturbines.php)
- [3] ŠUROVSKÝ, Jan. Spalovací turbíny. Česko: J. Šurovský, 2013, 245 s. ISBN 978-80-260-4106-1
- [4] ŠKOPEK, Jan. Tepelné turbíny a turbokompresory. 1. vyd. Plzeň, 2010, 244 s. ISBN 978-80-7043-862-6.
- [5] ŠUROVSKÝ, Jan. Mikroturbína: [energetická revoluce pro 21. století : malý zdroj elektřiny - velký skok pro lidstvo]. 1. vyd. Praha, 2003, 220 s.
- [6] GIAMPAOLO, Tony. Gas turbine handbook: principles and practice. 4th ed. Lilburn : Fairmont Press, c2009, xiii, 447 s. ISBN 978-1-4398-0191-8.
- [7] Prospěch, Luděk. 2014 „mikroturbína“ [online]. 14. 1. 2014 10:25 [cit. 20.1. 2014].
- [8] PBS Velká Bíteš [online]. [vid. 2014-02-05]. Dostupné z:  [<http://www.pbsvb.cz/divize-letecke-techniky>](http://www.pbsvb.cz/divize-letecke-techniky)
- [9] Technigeek. Micro gas turbine, extremely quite and environment friendly. In: Youtube [online]. Zveřejněno 03. 04. 2013 [vid. 2014-01-14]. Dostupné z [www: <http://www.youtube.com/watch?v=Al8elCF816g>](http://www.youtube.com/watch?v=Al8elCF816g)
- [10] Cycle Brayton. In: Wikimedia commons [online]. Wikimedia commons 2006 [vid. 2014-01-05]. Dostupné z:  [<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:T\\_cycle\\_Brayton.png>](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:T_cycle_Brayton.png)
- [11] DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 281 s. ISBN 80-730-0118-7.
- [12] RENFUS, J. Vysoce efektivní kondenzační kotel na zemní plyn. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 71 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [13] ISO Partial Load Performance. In: Capstone turbine corporation [online]. Capstone 2006. [vid. 2014-01-05]. Dostupné z:  [<http://www.wmrs.edu/projects/BAREnergy/resource%20docs/c-30%20manuals/410004\\_Model\\_C30\\_Performance.pdf>](http://www.wmrs.edu/projects/BAREnergy/resource%20docs/c-30%20manuals/410004_Model_C30_Performance.pdf)
- [14] Primus Laundry[online]. [vid. 2014-05-20]. Dostupné z:  [<http://www.primuslaundry.com/cz/tumble-dryers/t-line/t24/>](http://www.primuslaundry.com/cz/tumble-dryers/t-line/t24/)